

УДК 535.232.65: 681.7.069.32

К. И. Мунтян,
Е. П. Тимофеев, канд. техн. наук
Национальный научный центр
"Институт метрологии"
e-mail: timofeev@metrology.kharkov.ua

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАП-ДЕТЕКТОРА С ВЫСОКОЙ ВНЕШНЕЙ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

Введение

Анализ тенденций развития эталонной базы ведущих стран мира показывает, что метрологические центры Великобритании, Германии, России, США, Франции и Японии для воспроизведения энергетических и фотометрических единиц оптического излучения используют абсолютные криогенные радиометры [1]. Так как рабочий диапазон криогенных радиометров находится в области единиц и десятков микроватт, то для передачи воспроизводимой единицы в рабочий диапазон основного парка современных промышленных средств измерений необходим эталон-переносчик.

Лучшим кандидатом на роль эталона-переносчика в видимом и ближнем ИК диапазоне в настоящее время является фотодиодный трап-детектор [2]. Разработанные в начале 80-х годов прошлого столетия, трап-детекторы продолжают совершенствоваться и в настоящее время, так как требования к характеристикам эталонов, обусловленные развитием когерентной и некогерентной оптической техники и расширением областей ее применения, непрерывно возрастают.

Целью настоящей работы является разработка фотодиодного трап-детектора с высокой внешней квантовой эффективностью, предназначенного для применения в составе аппаратуры Государственного первичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения ДЭТУ 11-04-97, а также исследование его основных характеристик.

Конструкция трап-детектора

Как известно, к настоящему времени разработаны специальные типы кремниевых фотодиодов, внутренняя квантовая эффективность которых близка к единице [3]. Строго говоря, даже для этих специальных типов фотодиодов внутренняя квантовая эффективность является функцией характеристик материала фотоприемника, его конструкции, электрического режима, интенсивности облучения, температуры и доминирующих механизмов генерации темнового тока. Если эта функция стабилизирована, то погрешность абсолютного измерения световых потоков полностью определяется внешней квантовой эффективностью фотоприемника, т. е. потерями света за счет виньетирования, отражения и рассеяния измеряемого потока излучения.

Из литературы известно, что доминирующим источником погрешности измерения энергетических характеристик коллимированного оптического излучения является чувствительность трап-детектора к пространственному положению плоскости поляризации измеряемого светового потока [4]. Так как углы падения измеряемого излучения на светочувствительные площадки фотодиодов трап-детектора близки, как правило, к 45°, то даже малые отклонения от идеальной ориентации фотодиодов относительно измеряемого потока приводят к заметному изменению коэффициента поглощения трап-детектора.

Для уменьшения чувствительности к положению плоскости поляризации измеряемого потока в современных трап-детекторах второго поколения обычно используется пространственная конфигурация, представленная на рис. 1 [5]. Здесь измеряемый поток излучения претерпевает пять отражений от светочувствительных площадок фотодиодов и за счет наклона фотодиодов в разных плоскостях по отношению друг к другу условия отражения света от поверхности фотодиодов для разных поляризаций в итоге уравниваются. Однако полное уравнивание имеет место только для плоской волны, распространяющейся точно по оптической оси трап-детектора, и идеальной взаимной ориентации светочувствительных площадок фотодиодов. Реальный, не очень точно ориентированный по оси поток излучения с конечной расходимостью, распространяющийся в реальном, с погрешностями взаимного расположения фотодиодов, трап-детекторе при разных поляризациях поглощается неодинаково. В итоге внешняя квантовая эффективность такой конфигурации трап-детектора не превышает 99,9 %, то есть $\sim 0,1$ % энергии измеряемого оптического излучения теряется, что уже не удовлетворяет современным требованиям к характеристикам эталонов.

Нами предложена конфигурация трап-детектора, показанная на рис. 2 [6]. Этот трап-детектор содержит четыре фотодиода, расположенные в плоскости падения первичного оптического пучка излучения 5 на первый фотодиод 1 последовательно по ходу оптического пучка под разными углами друг к другу, при этом светочувствительная площадка одного из фотодиодов перпендикулярна падающему на нее оптическому пучку, и отличается от известных конструкций тем, что первый фотодиод 1 установлен на перпендикуляре 7 к светочувствительной площадке третьего фотодиода 3 таким образом, что его светочувствительная площадка перпендикулярна биссектрисе 6 угла α между направлениями хода оптического пучка 5 от первого фотодиода 1 на третий 3 и четвертый 4 фотодиоды.

В этой конфигурации измеряемый поток отражается от фотодиодов 11 раз, что существенно больше, чем в любой известной конструкции трап-детектора с четырьмя фотодиодами. За счет большого количества отражений изменение коэффициента отражения для разных поляризаций потока измеряемого излучения в этой конфигурации меньше, чем требования к погрешности эталона.

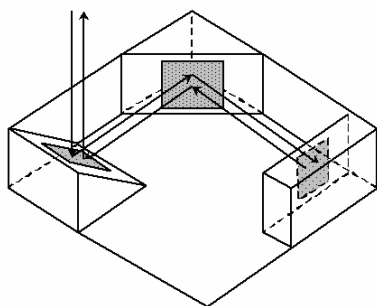


Рис. 1. - Трап-детектор второго поколения

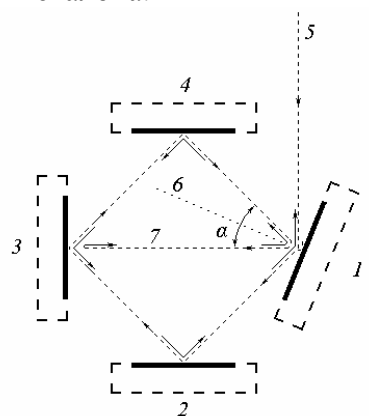


Рис. 2. - Предлагаемая конфигурация

Оценка необходимых параметров конструкции трап-детектора

Рассчитаем параметры конструкции трап-детектора, обеспечивающие внешнюю квантовую эффективность не менее 99,95 %. Расчет проведем для наихудшего случая - оптического пучка s-поляризации, имеющего максимальный коэффициент отражения. Ориентируемся на кремниевые фотодиоды фирмы HAMAMATSY PHOTONICS K.K. серии S1337-1010, которые имеют светочувствительную площадку 10 мм x 10 мм и

габариты 15 мм x 16,5 мм x 2,2 мм. Полагая, что неравномерность чувствительности по площадке фотодиода пренебрежимо мала, оценим потери оптического излучения за счет виньетирования, отражения и рассеяния.

Исходя из требований к погрешности эталона, при расчете конструкции трап-детектора принимаем, что доля каждого источника потерь излучения должна составлять не более 0,01 %.

Светочувствительные площадки фотодиодов являются апертурными диафрагмами в канале распространения пучка излучения. Потери за счет виньетирования излучения оцениваем согласно теории гауссовых пучков.

В любом сечении амплитуда U поля гауссова пучка имеет распределение

$$U(r, \omega) = e^{-\left(\frac{r}{\omega}\right)^2}$$

где r - поперечная координата, 2ω - диаметр поперечного сечения пучка на уровне e^{-1} .

Энергия E пучка диаметром $2r$ (в пренебрежении потерями на рассеяние и поглощение в среде распространения) есть

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^r U^2(r, \omega) r dr d\varphi = \frac{\pi\omega^2}{2} \left(1 - e^{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2} \right)$$

Полная энергия E_0 (при $r = \infty$) есть

$$E_0 = \frac{\pi\omega^2}{2}$$

Относительные потери δ есть

$$\delta = \frac{E_0 - E}{E_0} = e^{-2\left(\frac{r}{\omega}\right)^2}$$

откуда

$$r = \omega \left(-\frac{\ln \delta}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Для указанных выше относительных потерь $\delta = 0,0001$ получаем

$$2r = 2\omega \left(-\frac{\ln 0,0001}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = 2\omega \cdot 2,146$$

т.е. диаметр пучка, в котором содержится 99,99 % полной энергии излучения, примерно в 2,15 раза больше видимого диаметра пучка.

Оценку виньетирования получаем построением хода гауссового пучка в трап-детекторе методом развертки. Принимаем типичное значение конфокального параметра пучка $b = 0,1 \text{ м} \dots 1,0 \text{ м}$, длина волны излучения $\lambda = 0,633 \text{ нм}$, длина пути между двумя последовательными отражениями $l = 15 \text{ мм}$, количество отражений равно одиннадцати. Пучок излучения фокусируем на площадку первого фотодиода.

Диаметр $2r$ пучка на расстоянии z от перетяжки, согласно теории гауссовых пучков [7] и с учетом вышеизложенного, рассчитываем по формуле

$$2r = 2,146 \left(\frac{2\lambda b}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \left(\frac{2z}{b} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Расчет показывает, что максимальные диаметры пучков излучения с вышеуказанными конфокальными параметрами на протяжении всего пути распространения в трап-детекторе не превышают 2,0 мм, т.е. существенно меньше размеров светочувствительных площадок фотодиодов, следовательно, требование по допустимым потерям на виньетирование выполняется.

Абсолютное большинство известных конструкций трап-детекторов рассчитано на использование фотодиодов без защитных окон. Такой подход к эталонным трап-детекторам неприменим. Частицы различных веществ, откладывающиеся из атмосферного аэрозоля на светочувствительную площадку фотодиода, ухудшают долговременную стабильность его параметров как вследствие снижения оптического пропускания отложившегося слоя, так и вследствие химического взаимодействия с материалом светочувствительной площадки. Воспроизводимое восстановление параметров фотодиода чисткой его светочувствительной поверхности проблематично. Чистка же защитных окон с помощью средств, применяемых в оптической промышленности, хорошо освоена.

Фотодиоды фирмы HAMAMATSY PHOTONICS К.К. серии S1337-1010 выпускаются с защитными окнами из кварцевого стекла и оптического полимера толщиной 1 мм. Так как показатель поглощения кварцевого стекла в видимом диапазоне меньше, чем $\sim 0,0001 \text{ см}^{-1}$ [8], то потери в окне $\sim 0,001 \%$, поэтому выбираем фотодиод с кварцевым окном и потерями в материале защитного окна вследствие их малости пренебрегаем.

Защитное окно с оптической точки зрения играет двоякую роль. С одной стороны, окно выполняет функцию своеобразного просветляющего покрытия для фотодиода, снижая общий коэффициент отражения, большая величина которого обусловлена высоким показателем преломления материала светочувствительной площадки фотодиода в видимом диапазоне [9]. Расчеты показывают, что трап-детектор с фотодиодами без окон едва укладывается в требования технического задания на модернизацию эталона даже при одиннадцати переотражениях пучка излучения. Таким образом, эта просветляющая функция окна улучшает характеристики трап-детектора. С другой стороны, первичный оптический пучок, падающий на первый фотодиод, в защитном окне расщепляется на множество вторичных пучков, претерпевающих дальнейшее расщепление на последующих фотодиодах. Эта расщепительная функция окна ужесточает требования к геометрии взаимного расположения фотодиодов трап-детектора, к величине его поля зрения и к юстировке входного пучка относительно входной оси трап-детектора.

Расчет геометрии трап-детектора проводим, моделируя защитное окно плоскопараллельной пластиной с размерами, указанными в каталоге фирмы HAMAMATSY PHOTONICS К.К. Коэффициенты отражения обеих поверхностей определяем согласно теории Френеля для сред "воздух - кварцевое стекло" и "кварцевое стекло - кремний". Отличием показателей преломления легированного и нелегированного кремния пренебрегаем. Наличие окисного слоя не учитываем. Потери за счет обрезания вторичных пучков вычисляем с учетом многократного переотражения в пластине, используя элементы теории отражающего интерферометра. Рассматриваем только наихудший случай - когда все вторичные отраженные пучки синфазны.

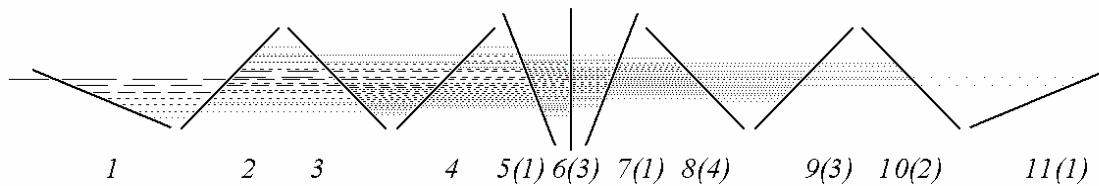


Рис. 3. - Туннельная диаграмма трап-детектора

Так как все пучки излучения распространяются в одной плоскости, то целесообразно располагать фотодиоды так, чтобы диагональ светочувствительной площадки лежала в этой же плоскости. Относительное расположение фотодиодов необходимо оптимизировать, чтобы уменьшить обрезание пучков. На рис. 3 показана развертка геометрического хода вторичных пучков интенсивностью не менее 0,00001 %, учитывающая взаимное расположение фотодиодов и пространственный сдвиг при каждом переотражении в защитных окнах. Интегральные потери зеркальной компоненты излучения вследствие обрезания пучков, согласно расчету, составляют не более 0,0032 %.

Оценка потерь на рассеяние

Потери на рассеяние определялись расчетным методом по данным экспериментального исследования индикатрисы рассеяния.

В эксперименте использовались гониометр ГС-5, измеритель мощности лазерного излучения ИМЛИ-2, снабженный диафрагменным коллиматором, и лазер ЛГН-302, дающий пучок излучения s-поляризации с угловой расходимостью $\theta \approx 3'$.

Исследуемый фотодиод устанавливался на оси поворотного стола гониометра под разными углами к падающему на него пучку лазерного излучения. Угловое распределение отраженного от светочувствительной площадки фотодиода излучения регистрировалось через диафрагменный коллиматор приемной головкой измерителя мощности, которая была установлена на корпусе зрительной трубы гониометра, вращавшейся вокруг поворотного стола.

Интенсивность j рассеянного света измерялась в диапазоне $0^\circ \dots 90^\circ$ через каждые $20'$ при углах падения первичного пучка излучения на светочувствительную площадку фотодиода вблизи $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ и 55° . Зарегистрированные индикатрисы $j_i = f(\theta)$ состоят из интенсивного центрального пика и слабых крыльев и практически идентичны друг другу. На рис. 4 показано наложение всех семи индикатрис в полулогарифмических координатах.

Экспериментально наблюдаемая индикатриса $j_i = f(\theta)$ рассеяния - это свертка реальной аппаратной функции $h(r)$ измерительного прибора и истинной индикатрисы $J_i = f(\theta)$ рассеяния оптического излучения светочувствительной площадкой фотодиода, закрытой защитным кварцевым окном [10].

Анализ экспериментальной индикатрисы рассеяния удобно начинать, полагая аппаратную функцию измерительного прибора δ -функцией, а затем аппроксимировать реальную двумерную аппаратную функцию $h(r)$ диафрагменного коллиматора осесимметричной прямоугольной функцией полушириной ε .

Как известно, свертка дельта-функции и гауссовского распределения интенсивности излучения полушириной θ в полулогарифмических координатах дает индикатрису в виде параболы полушириной θ , обращенной вершиной вверх. Прямоугольная аппаратная функция полушириной $\varepsilon \gg \theta$ уширяет эту параболу до величины $\sim \varepsilon$. Таким образом, центральный пик наблюдаемой в эксперименте индикатрисы соответствует зеркальной компоненте отраженного пучка. Наличие у пика крыльев говорит о присутствии в отраженном пучке диффузной компоненты.

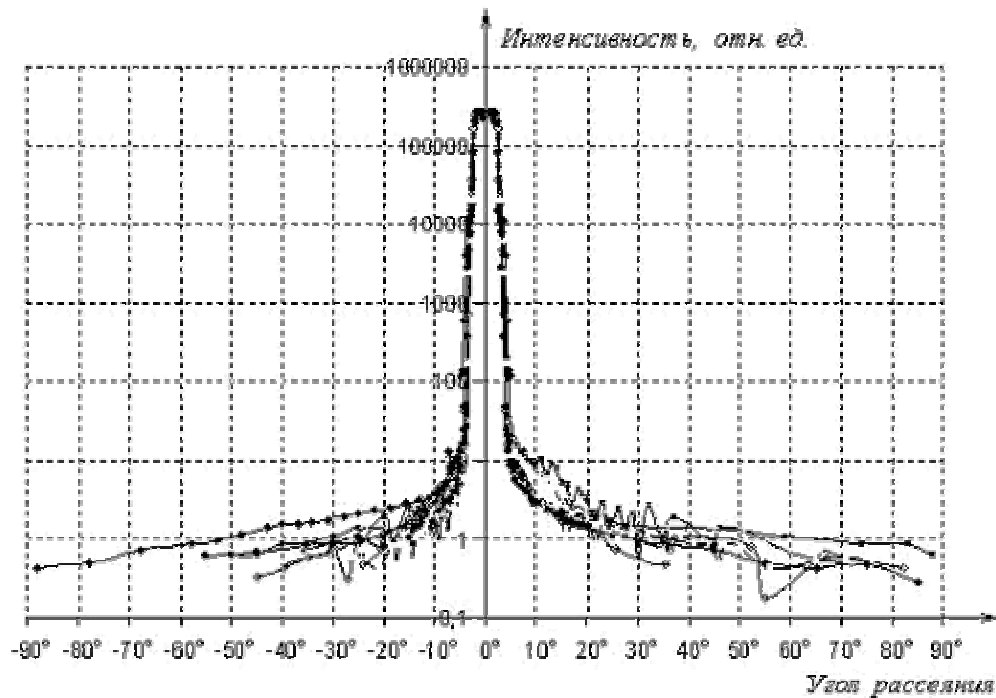


Рис. 4. - Наложение экспериментальных индикатрис

Характеристики зеркальной и диффузной компонент значительно различаются:

- зеркальная компонента высокоинтенсивна и сосредоточена в малом телесном угле ;
- диффузная компонента низкоинтенсивна и рассредоточена в большом телесном угле.

Различие характеристик компонент существенно облегчает оценку потерь на рассеяние.

Учитывая линейность интеграла свертки, малость угла расходимости падающего пучка и малость диффузной компоненты по центральному пику экспериментальной индикатрисы, находим, что полуширина прямоугольной аппаратной функции диафраг-менного коллиматора в нашем эксперименте составляет $h \approx 2,3^\circ$.

Усредненная по семи реализациям, сглаженная по 11 точкам и симметризованная диффузная компонента после вычитания темнового тока с достоверностью $R^2 = 0,96$ аппроксимируется гауссовой функцией

$$J(\theta) = 1,21e^{-0,000542 \theta^2}$$

с полушириной $\theta_{0,5} = 36^\circ$. Графики диффузной компоненты и аппроксимирующей гауссовой функции в полулогарифмических координатах показаны на рис. 5.

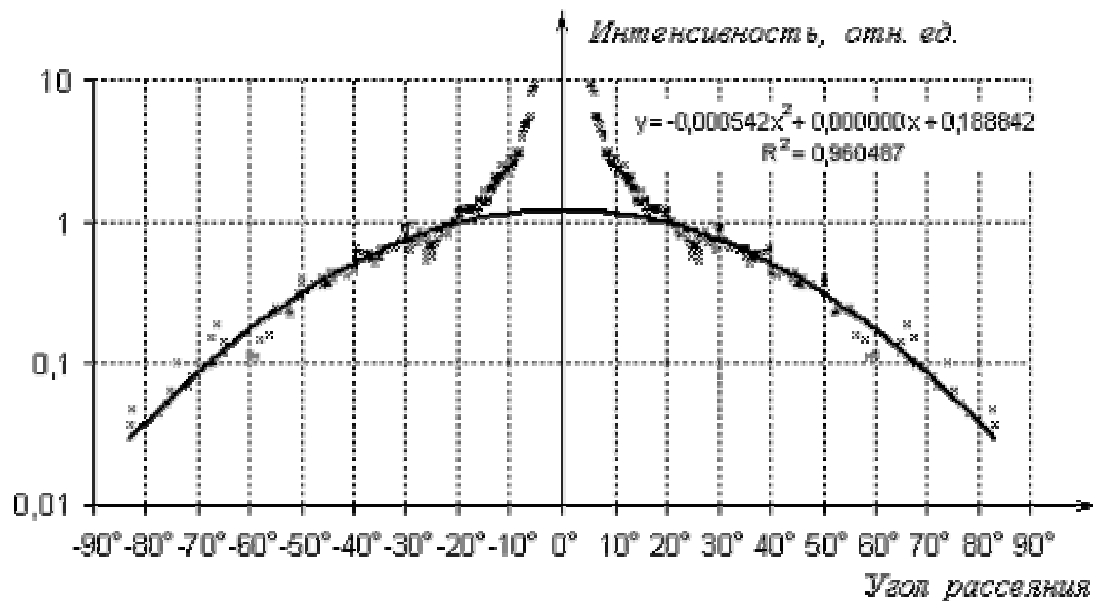


Рис. 5. - Аппроксимация диффузной компоненты гауссовой функцией

Так как полуширина аппаратной функции коллиматора на порядок меньше полуширины диффузной компоненты экспериментальной индикатрисы, то аппаратное уширение истинной индикатрисы незначительно. Представив экспериментальную индикатрису $j = f(\theta)$ через интегральные моменты аппаратной функции $h(r)$ коллиматора и производные истинной индикатрисы $J = f(\theta)$ как [11]

$$j(\theta) = m_0 J(\theta) + \frac{m_2}{2!} J''(\theta) + \dots \approx 2\epsilon A e^{-0,000542 \theta^2} \left[1 + \frac{\epsilon^2}{3} (0,001084 \theta^2 - 1) \right],$$

находим, что аппаратное уширение не превышает 0,037 %. Уширение за счет сглаживания еще меньше ($\sim 0,004$ %), поэтому ими пренебрегаем.

Расчет интегральной интенсивности для осесимметричной индикатрисы рассеяния показывает, что диффузная компонента содержит около 0,17 % энергии исходного пучка излучения. Примерно 20 % рассеянного излучения перехватывают фотодиоды трап-детектора, однако оставшаяся часть слишком велика и дает основной вклад в потери излучения.

Известно, что путем тщательного отбора фотодиодов можно снизить диффузную компоненту излучения до 0,000001 ... 0,0001 % [12]. Важность такого отбора и последующей экспериментальной оценки величины рассеяния невозможно переоценить, так как это основной путь снижения доминирующих потерь излучения за счет диффузного рассеяния.

Выводы

Приведенные результаты подтверждают возможность применения предложенной конфигурации трап-детектора при проведении точных измерений энергетических параметров лазерного излучения. Анализ показывает, что при использовании предложенной конфигурации трап-детектора в аппаратуре Государственного первичного эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения ДЭТУ 11-04-97 при условии отбора фотодиодов с минимальным рассеянием измеряемого излучения возможно обеспечение погрешности передачи единицы мощности на уровне 0,05% в диапазоне мощностей от $1,0 \cdot 10^{-5}$ Вт до $1,0 \cdot 10^{-3}$ Вт. Для

использования предложенной конфигурации трап-детектора в более широком динамическом диапазоне мощностей необходимо дополнительное исследование линейности используемых фотодиодов с учетом влияния плотности измеряемого лазерного излучения.

Литература

1. N. P. Fox, P.R. Haycocks, J.E Martin, I. Ul-Haq, A mechanically cooled portable cryogenic radiometer. Metrologia, 1995/96, № 32, p. 581-584
2. E. F. Zalewski, C. R. Duda. Silicon photodiode device with 100 % external quantum efficiency. Appl. Opt., 1983, v. 22 (18), p. 2867-2873.
3. HAMAMATSY PHOTONICS K.K., Cat. No KSPD1032E01, Mar. 2001 DN
4. [R Goebel](#) et al.. Polarization dependence of trap detectors. Metrologia, 1996, № 33, p. 207-213
5. J. M. Palmer. Alternative configurations for trap-detectors. Metrologia, 1993, № 30, p. 327-333
6. Трап-детектор. Заявка № a201102791 от 10.03.2011
7. Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators. Appl. Opt., Oct 1966, v. 5, № 10, p. 1550-1567
8. ГОСТ 15130-86 Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.
9. M. A. Green and M. J. Keevers. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 3, issue 3, pp. 189 - 192, 1995.
10. С. Директор, Р. Рорер. Введение в теорию систем. "Мир", Москва, 1974 г.
11. А. Папулис. Теория систем и преобразований в оптике. "Мир", Москва, 1971 г.
12. M. Sildoja, F. Manoocheri and E. Ikonen. Reflectance calculations for a predictable quantum efficient detector. Metrologia, 2009, № 46, p. 151-154

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАП-ДЕТЕКТОРА З ВИСОКОЮ ЗОВНІШНЬОЇ КВАНТОВОЇ ЕФЕКТИВНІСТЮ

К. І. Мунтян, Є. П. Тимофеев

Наведені результати розробки трап-детектора для дослідження енергетичних характеристик оптичного випромінювання.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF TRAP-DETECTOR WITH HIGH EXTERNAL QUANTUM EFFICIENCY

K. I. Muntean, Ye. P. Timofeev

The results of development of the trap-detector for research of optical radiation power descriptions is reported.